



El análisis del error humano en la manufactura: un elemento clave para mejorar la calidad de la producción

The analysis of human error in manufacturing: a key to improve production quality

Yaniel Torres-Medina

Departamento de Ingeniería Mecánica, École de Technologie Supérieure de Montréal, Canada.
Orcid: 0000-0002-9825-9437. Correo electrónico: yaniel.torres-medina.1@ens.etsmtl.ca

Recibido: 5 abril, 2020. Aceptado: 10 junio, 2020. Versión final: 16 julio, 2020.

Resumen


A pesar del creciente nivel de automatización industrial, el ensamblaje manual continúa desempeñando un rol fundamental en diversos sectores de la manufactura. Sin embargo, las operaciones de tipo manual son susceptibles de errores humanos que ocasionan problemas de calidad y pérdidas económicas. El presente artículo se propone mostrar algunos métodos que permiten identificar diferentes tipos de errores y evaluar la influencia de factores que afectan el desempeño del trabajador. Se muestran, en particular, los métodos SHERPA y HEART. Igualmente se discute sobre la importancia de considerar la complejidad del ensamblaje por su negativo impacto en la carga cognitiva del trabajador lo que puede aumentar la probabilidad de error. En el artículo se emplean conceptos provenientes de la literatura especializada y se realiza una articulación de varias ramas del conocimiento tales como la ergonomía, la ingeniería industrial y la fiabilidad de sistema.

Palabras clave: fiabilidad humana; sistema de ensamblaje; complejidad; ergonomía; mejora continua; carga cognitiva.

Abstract

Despite the increasing level of automation in manufacturing, manual assembly continues to play a key role in several production domains. However, manual assembly operations are susceptible to human errors which cause quality problems and economic losses. This article aims to present some methods that allow the identification of different types of errors as well as factors that affect operator performance. Among these methods are SHERPA and HEART. The article also discusses the importance of considering the complexity of the task because of the negative impact on the cognitive load of the worker which increases the risk of error. For the discussion, different concepts from the specialized literature are used while an articulation of different branches of knowledge such as ergonomics, industrial engineering and system reliability is made.

Keywords: human reliability; assembly system; complexity, ergonomics, continuous improvement cognitive load.

ISSN impreso: 1657 - 4583. ISSN en línea: 2145 – 8456, **CC BY-ND 4.0** 

Como citar: Y. Torres-Medina, “El análisis del error humano en la manufactura: un elemento clave para mejorar la calidad de la producción,” *Rev. UIS Ing.*, vol. 19, no. 4, pp. 53-62, 2020, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v19n4-2020005>

1. Introducción

Desde hace décadas la industria manufacturera se ha caracterizado por un creciente nivel de automatización. A pesar de esta fuerte tendencia, el trabajo humano es aún una opción rentable en diversos contextos, tal es el caso de procesos de producción de elevada complejidad y variedad. Por esta razón las operaciones manuales siguen siendo de gran importancia en sectores como la fabricación de automóviles y de equipos electrodomésticos, la producción de motores de combustión y de maquinaria industrial o en la manufactura aeronáutica [1-3]. Desafortunadamente los humanos no son infalibles por lo que las operaciones manuales pueden ser una fuente importante de errores que afectan la calidad de la producción y ocasionan pérdidas económicas. A pesar de lo anterior, los errores humanos han sido poco estudiados en la manufactura industrial en comparación con sectores de alto riesgo como la industria nuclear, la petroquímica, o la aviación [4]. Lo que puede explicarse por las posibles consecuencias catastróficas asociadas a las fallas humanas en estos últimos, lo cual no es el caso en la manufactura. Sin embargo, se ha reconocido que el análisis del error humano puede ser una estrategia eficaz para el mejoramiento de la calidad en la manufactura [5] si el análisis se centra en la identificación de factores que permitan mejorar el desempeño humano y del sistema [6]. Durante el proceso de análisis el error humano no debe verse como la causa primaria de los problemas de calidad, ni debe ser empleado para atribuir culpa al trabajador desde un inicio, sino que se debe privilegiar un análisis que conduzca a la búsqueda de causas más profundas en el sistema de trabajo.

El presente artículo se propone mostrar algunos métodos que permiten identificar diferentes tipos de errores, así como evaluar el impacto de los factores que afectan el desempeño de los trabajadores. Par ello se describe inicialmente la evolución histórica de la manufactura y de los sistemas de ensamblaje señalando el impacto negativo que los errores humanos tienen en la calidad de la producción. Se discute la importancia de la complejidad como factor que aumenta el riesgo de error humano. Los conceptos e ideas discutidas en el artículo pueden resultar de utilidad para diversos profesionales encargados de gestionar actividades productivas en la manufactura industrial.

2. Evolución de la manufactura

2.1. Líneas de montaje y producción en serie

A finales del siglo XIX y principios del siglo XX un conjunto de avances tecnológicos e invenciones

impulsaron la industrialización de la sociedad en varios países, principalmente en Inglaterra, Estados Unidos (E.U) y Alemania [7]. Entre estos avances se destacan la electrificación, el desarrollo de la petroquímica, la expansión del transporte ferroviario, los avances en la industria metalúrgica y en la producción de papel y la invención del automóvil, entre muchos otros. Dentro de esta revolución tecnológica, Henry Ford es reconocido como uno de los principales innovadores en el sector de la manufactura industrial y es considerado en la historia como el padre de la producción en masa. Su principal aporte fue la introducción de las líneas de montaje como eje central del proceso de fabricación de automóviles al mismo tiempo que implementó la estandarización como un principio fundamental de la producción [8]. Estas ideas Henry Ford las adaptó y mejoró mediante principios rigurosos, aunque ya eran empleadas de forma más rudimentaria en la industria del armamento y del empaquetado de carne en EE. UU.

Una línea de montaje es una forma de organizar un proceso productivo de manera que las piezas se añaden sistemáticamente a través de un flujo de trabajo para obtener un producto final (Figura 1). Cada trabajador en la línea de montaje tiene una función específica en el proceso. El Modelo T de Ford Motors Company fue el primer automóvil producido en masa empleando líneas de montaje, así como piezas intercambiables. La idea de Henry Ford era reducir significativamente los costos de producción a partir del incremento de la productividad: mayor número de unidades producidas por unidad de tiempo. De esta manera el Modelo T se convirtió en un automóvil accesible a la clase media durante los casi 20 años que se produjo (1908-1927). Aunque el Modelo T se fabricó en algunos periodos en varios colores, la mayor parte de la producción se hizo en color negro. Los niveles de productividad alcanzados por Ford Motor Company con su nueva forma de organizar la fabricación automotriz fueron impresionantes para su época y sigue siendo un hito para las disciplinas del estudio del trabajo.

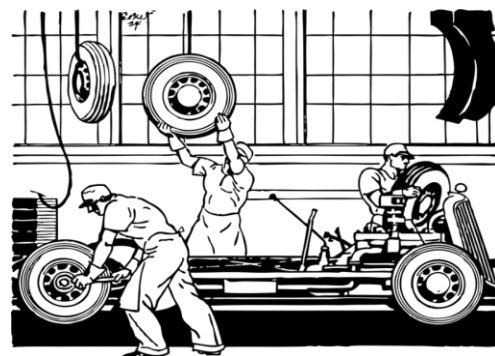


Figura 1. Línea de montaje. Fuente: Pixabay.

2.2. La automatización y la Industria 4.0

Las líneas de montaje han evolucionado grandemente desde que Henry Ford expandiese este nuevo concepto a inicios del siglo XX. Esta forma de organizar la producción se ha extendido a una gran diversidad de sectores fuera de la industria automotriz. A la misma vez, el desarrollo de la robótica industrial ha permitido incrementar significativamente los niveles de automatización. En particular en algunas fases de los procesos de manufactura en las cuales la intervención directa del humano es cada vez más limitada. Sin embargo, en función de criterios tales como la complejidad del producto, el número de variantes, la flexibilidad necesaria de la producción o la productividad deseada, los ingenieros pueden considerar la posibilidad de utilizar sistemas de montaje manuales, automatizados o híbridos [1, 9]. Con la llegada de la Industria 4.0 el nivel de automatización en la manufactura seguirá incrementando y aunque no se prevé que los trabajadores sean completamente substituidos, sí deberán adaptarse a nuevas formas de interacción con los sistemas digitales y automatizados. Como resultado ha surgido el concepto de Operador 4.0: *"entendido como un operador inteligente y hábil que realiza no sólo el trabajo cooperativo con los robots, sino también el trabajo ayudado por máquinas y si es necesario por medio de sistemas ciber físicos humanos (...)"* [10]. A pesar de esta evolución, el ensamblaje manual complejo seguirá necesitando del conjunto de habilidades humanas, aunque estas podrán ser soportadas por diversas tecnologías como la realidad virtual, la realidad aumentada, los exoesqueletos o los reboces colaborativos, entre otras [11, 12].

La Industria 4.0 se caracteriza por la integración de sistemas de manufactura inteligentes y autorregulables supervisados por la inteligencia artificial los cuales emplea gran cantidad de datos provenientes de la producción. Estos datos son el resultado de una elevada interconectividad de los objetos como parte de sistemas ciber-físicos. De esta manera la fabricación se caracterizará por una fuerte personalización de los productos, lo que implicará un aumento del número de variantes y una reducción de los tamaños del lote (*Mass Customization*, en inglés). Esto a su vez tendrá un impacto en la complejidad de la producción y del ensamblaje manual [13, 14].

3. Error humano y calidad de la producción

Desde el punto de vista conceptual un error humano es *"cualquier conjunto de acciones o actividades humanas que exceda algún límite de aceptabilidad, es decir, una acción fuera de tolerancia en la que los límites de desempeño están definidos por el sistema"* [15]. De

manera similar, Hollnagel [16] nos propone considerar el error humano como: *"una acción humana identificable que, en retrospectiva, se considera la causa de un resultado no deseado"*. En cualquiera de los casos, un error humano implica una desviación con respecto a un resultado esperado. Esta desviación se manifiesta generalmente en la manufactura como un problema de calidad.

Para garantizar la calidad de la producción final, los sistemas de ensamblaje manual requieren de la correcta ejecución de un conjunto de operaciones básicas entre las cuales se encuentran: seleccionar, posicionar, acoplar, apretar y verificar, entre otras. Algunas de estas operaciones se ejecutan empleando herramientas para facilitar el trabajo (Figura 2). Sin embargo, la mayoría de estas operaciones siguen siendo de naturaleza manual, lo que hace del error humano una fuente potencial de problemas de calidad. Por esta razón diversos tipos de errores asociados al ensamblaje han sido reportados en la literatura [17-19], entre los que se destacan:

1. Conexiones sueltas
2. Piezas o componentes faltantes
3. Daños durante la manipulación
4. Instalación de una pieza incorrecta
5. Contaminación del objeto de trabajo

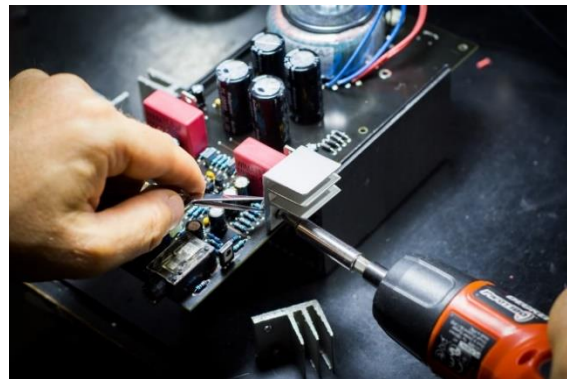


Figura 2. Ensamblaje electrónico. Fuente: Pixabay.

A título de ejemplo, en un estudio realizado en una planta de Volvo en Suecia, en el cual se analizó un volumen de producción de 47 061 automóviles, los autores encontraron que los errores más frecuentes fueron: partes sueltas o instaladas en posición incorrecta, componentes apretados con nivel de fuerza erróneo y tornillos y clips faltantes [20]. Otros errores hallados en el mismo estudio fueron rasguños o suciedad en las partes y componentes, así como cables o tubos desconectados o insuficientemente apretados.

Sectores de manufactura de alta fiabilidad como es el caso de la fabricación aeronáutica no escapan a esta realidad. Recientemente, la compañía Boeing se vio obligada a poner en tierra sus aviones cisterna KC-46 (modificación del Boeing 767) cuando la Fuerza Aérea de los EE. UU y principal comprador de este modelo de avión, expresó su preocupación por haber encontrado restos de objetos extraños (*Foreign Object Debris*, en inglés) en varios lugares dentro del fuselaje de los aviones terminados [19]. Estos restos de objetos extraños suelen ser piezas, instrumentos de trabajo u otros objetos dejados por los trabajadores en el interior de la armazón del avión.

Las pérdidas económicas asociados a errores en el ensamblaje manual son significativas debido al negativo impacto en la calidad. En un artículo publicado por Falck y Rosenqvist [20] los autores desarrollan un modelo matemático para calcular los costos de problemas de calidad en el ensamblaje manual asociados a condiciones ergonómicas inadecuadas. En su modelo matemático los autores proponen un conjunto de categorías de costos entre las cuales se destacan:

- Retrabajo: Tiempo extra de ensamblaje dedicado a corregir el error sobre el producto.
- Piezas descartadas: Costos de los componentes estropeados y desechados que no pueden ser reutilizados.
- Postventa: Costos de corrección de un producto entregado al cliente tales como transportación y gestiones administrativas.
- Seguimiento: Tiempo invertido por el personal en esfuerzos adicionales para analizar el problema (reuniones, investigación, redacción de informes).
- Imagen: Costos asociados a la pérdida de imagen de la marca o posible pérdida de un cliente cuyo valor es difícil de estimar, pero su impacto es real.

4. El análisis del error humano

El proceso de análisis del error humano es conocido como fiabilidad humana o *Human Reliability Analysis (HRA)* en inglés y su desarrollo histórico está asociado al análisis de riesgos de accidentes en el sector nuclear [21]. Existen diversos métodos para el análisis del error humano. Algunos permiten identificar la posibilidad de

ocurrencia de errores mientras otros permiten calcular la probabilidad del error.

Los métodos de identificación de errores se basan en sistemas de clasificación o taxonomías las cuales son establecidas por los autores del método a partir de estudios sobre procesos cognitivos humanos. Varios métodos de este tipo han sido desarrollados y aplicados en diversos sectores [22]. Un método de gran flexibilidad y relativa simplicidad es el método SHERPA (*Systematic Human Error Reduction and Prediction Approach*). SHERPA permite la identificación estructurada de modos de error asociados a operaciones específicas dentro de una tarea. El método fue desarrollado en el Reino Unido por el profesor David Embrey [23] y está inspirado en los conocidos métodos de fiabilidad de sistemas FMEA (*Failure Modes and Effects Analysis*) y HAZOP (*HAzard and Operability Study*).

En la Tabla 1 se muestran un conjunto de modos de error que forman parte del sistema de clasificación de errores del método SHERPA. Este método ha sido empleado en diversos sectores incluyendo la manufactura [24]. Otros métodos empleados para la identificación del error son HFACS (*Human Factors Analysis and Classification System*) y PHECA (*Potential Human Error Cause Analysis*) entre otros [22].

Tabla 1. Algunos modos de error propuestos por el método SHERPA

| Categoría | Modo de error |
|--------------|---|
| Acción | Acción fuera de tiempo |
| | Acción en dirección incorrecta |
| | Acción desalineada |
| | Acción correcta sobre objeto incorrecto |
| | Acción omitida |
| Chequeo | Acción incompleta |
| | Chequeo omitido |
| | Chequeo incompleto |
| Información | Chequeo incorrecto en objeto correcto |
| | Información no obtenida |
| | Información errónea obtenida |
| Comunicación | Obtención de información incompleta |
| | Información no comunicada |
| | Información errónea comunicada |
| Selección | Información incompleta comunicada |
| | Selección omitida |
| | Selección incorrecta |

Fuente: [25].

Por otra parte, los métodos de cuantificación de la probabilidad del error humano se derivan de la disciplina de la fiabilidad de sistema. Normalmente incluyen una etapa de identificación del error previa a la

cuantificación. Bajo este enfoque el error humano se considera matemáticamente de forma similar al fallo de un componente técnico en un sistema. Se parte del principio que a cada tipo de tarea se le puede relacionar un cierto valor de probabilidad llamada Probabilidad de Error Humano (PEH). La formulación matemática simplificada es la siguiente:

$$PEH = \frac{n.^\circ \text{ de errores observados}}{n.^\circ \text{ total de posibilidades de error}} \quad (1)$$

La ecuación 1 se puede redefinir en términos de las tareas realizadas por el operador. Debe especificarse que esta probabilidad sólo puede calcularse a la luz de un tipo específico de tarea que llamaremos tipo de tarea *i*. De esta manera la Probabilidad de Error Humano de la tarea *i* (PEHi) quedaría expresada de la manera siguiente:

$$PHEi = \frac{n.^\circ \text{ tareas (tipo i) incorrectas}}{\text{Total de tareas (tipo i)}} \quad (2)$$

En la práctica la probabilidad de error asociada a un tipo de tarea se obtiene de diversas formas. Una forma es, por ejemplo, a partir de estudios de laboratorio. En estos estudios los sujetos realizan diversas tareas bajo condiciones variadas y se evalúa el número de fallos con respecto al total de veces que la tarea fue realizada. De esta manera también se puede determinar la influencia de ciertos factores sobre la probabilidad de error. Los factores que influyen en la probabilidad de error se les llaman PSF (*Performance Shaping Factors*, en inglés) o factores moduladores del desempeño. Estos factores constituyen características humanas individuales, así como características del entorno, la tarea o la organización del trabajo que pueden aumentar o reducir el desempeño humano y por lo tanto tener un efecto en la fiabilidad humana. La mayoría de los métodos de cuantificación del error humano proponen valores de probabilidad asociados a diversos tipos de tareas genéricas. A estos valores se les denomina probabilidad de error genérico (PEG).

Entre los métodos de cuantificación de la probabilidad de error más utilizados se encuentra THERP (*Technique for Human Error-Rate Prediction*), HEART (*Human Error Assessment and Reduction Technique*), SLIM-MAUD (*Success Likelihood Index Method and Multi-Attribute Utility Decomposition*). Aunque se reconoce que uno de los métodos con mayor potencial para ser empleado en contexto de manufactura y ensamblaje manual es HEART [6, 24, 26]. En este último método, para cuantificar la probabilidad de error humano (PHE), se comienza por seleccionar un valor de probabilidad de error genérico. En general, cada método propone una lista

de diferentes tipos de tareas genéricas y sus correspondientes probabilidades de error. Como se mencionó anteriormente estos valores se obtienen a partir de datos experimentales o estadísticos. La tarea objeto de análisis se debe clasificar en uno de los tipos de tareas genéricas propuestos por el método para así asignarle un valor de PEG. En la Tabla 2 se muestran tres tipos de tareas y sus respectivas probabilidades de error según el método HEART.

Tabla 2. Ejemplo de tareas genéricas y sus probabilidades de error respectivas

| Tarea Genérica | PEG | Percentiles 5 - 95 |
|---|------|--------------------|
| Tarea compleja que requiere un alto nivel de comprensión y habilidad | 0.16 | 0.12 - 0.8 |
| Tarea bastante simple realizada rápidamente o a la que se presta poca atención | 0.09 | 0.06 - 0.13 |
| Tarea rutinaria, altamente practicada y rápida que implica un nivel relativamente bajo de habilidad | 0.02 | 0.007 - 0.045 |

Fuente:[26].

Una vez seleccionado el valor de PEG el mismo debe modificar teniendo en cuenta los factores moduladores del desempeño o PSF. Los métodos incluyen una lista de PSF y su influencia relativa en el cálculo del valor de probabilidad de error humano. La Tabla 3 muestra siete ejemplos de factores moduladores del desempeño tomados de la lista de 40 propuestos por HEART.

Tabla 3. Ejemplos de factores moduladores del desempeño y sus multiplicadores respectivos

| Factor modulador del desempeño | Máximo multiplicador |
|--|----------------------|
| No hay medios obvios para revertir una acción no intencionada | x 8 |
| Ambigüedad en los estándares de rendimiento requeridos | x 5 |
| La retroalimentación del sistema pobre o ambigua. | x 4 |
| Inexperiencia del operador (recién calificado, pero no un "experto") | x 3 |
| Instrumentación poco fiable (suficiente como para que se note) | x 1.6 |
| Estrés emocional de alto nivel | x 1.3 |
| Interrupción de los ciclos normales de trabajo-sueño. | x 1.1 |

Fuente:[26].

4.1. Factores que influyen en el error humano

Las causas de los errores se asocian frecuentemente al diseño del sistema de trabajo o a algunos elementos del entorno de trabajo, por ejemplo, la carga de trabajo, el ritmo de trabajo, el contenido complejo o las instrucciones poco claras, entre otros. En la práctica existen un sinnúmero de factores que pueden tener una influencia en el desempeño humano. Una reciente revisión bibliográfica de 73 estudios empíricos muestra cómo las exigencias físicas y cognitivas sobre el trabajador, así como algunos factores individuales, influyen en su desempeño en términos de productividad, pero también en términos de calidad [27]. La revisión provee un modelo simplificado de cómo diferentes factores asociados al trabajo tienen efectos en el humano que pueden traer consigo errores y efectos negativos en el sistema de trabajo: accidentes, problemas de calidad, producción deficiente, entre otros (Figura 3). A título de ejemplo, en una tarea en la cual un trabajador debe inspeccionar visualmente detalles relativamente pequeños en un producto, el nivel de iluminación es un factor del ambiente de trabajo que tiene un impacto en el desempeño del trabajador.

Otro factor podría ser la postura ya que fijar la vista en un plano horizontal puede conllevar a una flexión importante en el cuello ocasionando dolor y molestia. La fatiga visual puede también instalarse como consecuencia de tensiones en los músculos oculares al tener que fijar la vista por largos períodos de tiempo. Otros factores como la monotonía, la repetitividad y la presión de tiempo pueden también estar presentes e interactuar generando una situación en la cual el desempeño humano puede verse afectado. Como

consecuencia los errores pueden aparecer. Estas interacciones no son lineales ni unidireccionales. Es por ello por lo que el modelo de la Figura 3 propone un camino alternativo. Los factores que influyen en el error humano no tienen necesariamente que causar efectos en el humano o incluso los errores pueden aparecer antes que se generen efectos negativos en el trabajador. Cualquier intervención enfocada a la disminución del error humano debe identificar los factores que influyen en el desempeño humano. Se deben identificar en el contexto de la tarea objeto de análisis para posteriormente implementar medidas que mejoren el sistema de trabajo.

Uno de los factores que influye de manera significativa en el error humano es la complejidad de la tarea. Un nivel elevado de complejidad puede aumentar a su vez la carga de trabajo mental. La complejidad incluye diferentes elementos cuyo denominador común es su influencia en los procesos cognitivos. Si se pretende reducir los errores, la reducción de la complejidad puede representar una alternativa eficaz. Por esta razón el estudio de la complejidad en el ensamblaje manual es un tema que ha ganado importancia en los últimos tiempos [13, 28-30] y el cual se discute con más detalles en los acápites subsiguientes.

4.2. La complejidad en el ensamblaje

La complejidad en el ensamblaje representa el conjunto de factores que pueden generar una carga cognitiva asociada a procesos mentales. Al centro de la complejidad se encuentra la cognición humana en particular lo referente al procesamiento de información y al razonamiento.

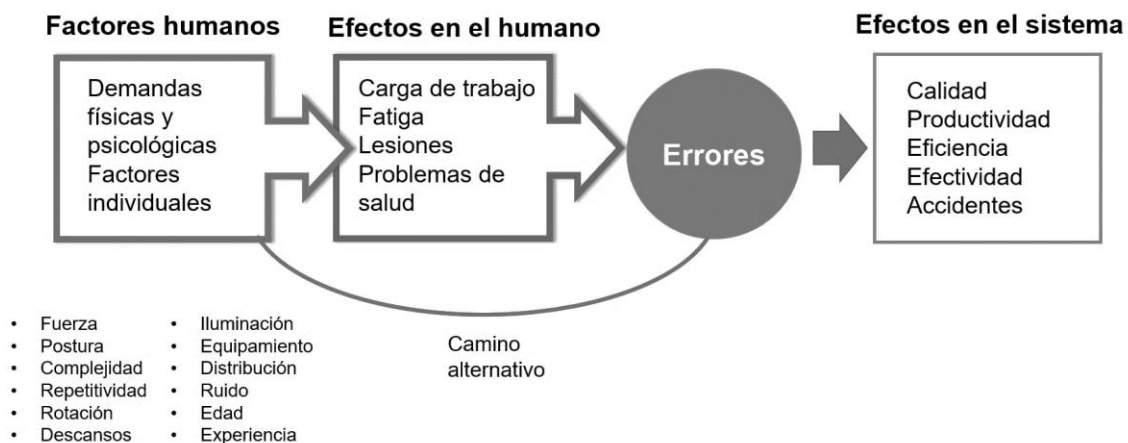


Figura 3. Marco teórico para entender la relación entre los factores humanos y los efectos en el sistema.

Fuente: [22].

En la literatura se reportan dos tipos de complejidad, la complejidad estructural y la complejidad dinámica. Las estrategias para la reducción de la complejidad varían según su clasificación en uno de estos dos tipos.

4.2.1. Complejidad estructural

Representa un atributo intrínseco al objeto de ensamblaje y depende de elementos estructurales tales como: número de componentes, la manera en que estos componentes interactúan, el número de selecciones posibles y la geometría del conjunto (cantidad de planos simétricos). Las acciones para reducir la complejidad intrínseca del ensamblaje deben implementarse durante las etapas de diseño. Sin embargo, incluso en los mejores casos en los cuales esta complejidad se pueda reducir siempre existe un nivel de complejidad irreducible por debajo del cual no es posible seguir reduciendo la complejidad sin cambiar la funcionalidad del objeto a ensamblar.

La metodología Diseño para el ensamblaje o *Design for Assembly* (DFA) en inglés, fue desarrollada con el objetivo de simplificar el ensamblaje manual. La idea subyacente es que el producto debe contener el menor número posible de piezas y que el diseño debe facilitar el montaje (facilidad de agarre, posicionamiento y manejo) con el objetivo de reducir el tiempo de operación y evitar fallos [31, 32]. Algunos principios contenidos en la metodología son:

- Asegurar la buena accesibilidad, así como la visibilidad a los diversos elementos durante las operaciones de ensamblaje.
- Minimizar el número total de partes individuales, si es posible. Para facilitar este objetivo, pueden utilizarse componentes de uso múltiple.
- Simplificar el ensamblaje eliminando el exceso de partes y combinando dos o más partes en una, si es funcionalmente posible.
- Evitar la necesidad de rotación, liberación y reajuste. La inserción vertical siempre es preferible, ya que utiliza la gravedad para realizar la tarea.
- Substituir, si es posible, tornillos con roscas por otro sistema de sujeción como el ajuste a presión o remaches.

El *Design for Assembly* (DFA) como cualquier metodología tiene limitaciones. El diseño de ciertos

productos debe priorizar la robustez y la fiabilidad. Por lo tanto, un despliegue completo de la metodología DFA no es posible en todos los procesos de fabricación o incluso deseable. A título de ejemplo, el diseño de un motor de avión prioriza la maximización de la fiabilidad y la robustez frente a la reducción de la complejidad del ensamblaje. En este caso es más importante evitar una falla en el funcionamiento del motor que reducir la complejidad modificando su estructura. Por esta razón se han desarrollado otras metodologías en función del objetivo a optimizar durante la fase de diseño. Al grupo o familia de estas metodologías se les denomina Diseño para X o *Design for X* (DFX) en inglés, entre las cuales se encuentran, además del Diseño para el ensamblaje [33]:

- Diseño para el mantenimiento (*Design for maintainability*)
- Diseño para la funcionalidad (*Design for functionality*)
- Diseño para la usabilidad (*Design for usability*)
- Diseño para la productibilidad (*Design for producibility*)
- Diseño robusto (*Robust design*).

Esta lista no es exhaustiva ya que existen muchas otras metodologías que forman parte del *Design for X* (DFX). Por ejemplo, en una obra de referencia sobre temas universales en el diseño el autor menciona al menos 17 tipos diferentes de metodologías DFX [33].

4.2.2. Complejidad dinámica

La complejidad dinámica, por otro lado, es situacional y está asociada a la interacción del trabajador con las instrucciones y el objeto de ensamblaje. El ensamblaje manual puede ser considerado como una habilidad para resolver problemas espaciales que demanda de los trabajadores la construcción de una representación mental para comprender y manipular la información espacial [34]. Si las instrucciones no están claras o no se diseñan teniendo en cuentas los principios del tratamiento de información en los humanos, esto puede conllevar a aumentar la carga cognitiva. Es por ello por lo que se deben respetar los principios de la economía del procesamiento de la información. Algunos aspectos que deben ser considerados durante el diseño y selección de los sistemas de información con los cuales el trabajador interactúa son:

- Proveer elementos visuales como apoyo a las instrucciones de trabajo: esquemas, croquis o dibujos.
- Desarrollar instrucciones de trabajo dinámicas con empleo de animaciones en 3D o videos ilustrativos.
- Optimizar el diseño de la interfaz y la información presentada: de forma lógica, coherente, ordenada según una secuencia estereotípica (izquierda-derecha, sentido horario).
- Facilitar el acceso a las instrucciones de trabajo desde el emplazamiento donde se ejecuta el ensamblaje.
- Emplear colores para resaltar los visuales y asegurar un contraste adecuado.

La formación y el desarrollo de habilidades y competencias que ayuden a mejorar el desempeño del trabajador también son elementos que influyen en la complejidad dinámica.

4.2.3. Evaluación de la complejidad

El creciente interés por el tema de la complejidad en el ensamblaje manual ha favorecido el desarrollo de varios métodos de evaluación de la complejidad adaptados al contexto de la manufactura industrial. Falck et al. [30] presenta dos de estos métodos. El primero, el Índice de complejidad o *Complexity Index* (CXI) en inglés, evalúa la percepción del operador de la complejidad del ensamblaje durante el proceso de producción. Mientras el segundo método descrito por los autores y denominado Complejidad básica del ensamblaje, o *Basic Assembly Complexity* (CXB) en inglés, se centra en la evaluación predictiva de la complejidad durante las fases de desarrollo temprano del producto. *Complexity Index* (CXI) consiste en un cuestionario de autoevaluación compuesto por 24 elementos asociados al sistema de trabajo. Como resultado de la autoevaluación se obtiene un índice final que permite clasificar la complejidad en baja, media o elevada [35]. *Basic Assembly Complexity* (CXB) emplea 16 criterios que son evaluados en base a su presencia o no en el diseño del objeto de ensamblaje. La complejidad se clasifica finalmente en cinco niveles que van de bajo a elevado [36]. Otros métodos para evaluar la complejidad del ensamblaje manual han sido igualmente desarrollados empleando enfoques similares. Tal es el caso del método denominado Complejidad de la selección de la operación, *Operation Choice Complexity*

(OCC) en inglés y de la Calculadora de complejidad, *Complexity Calculator* (CXC) en inglés [37, 38]. De manera general estos métodos son relativamente fáciles de aplicar pues emplean como instrumento de evaluación cuestionarios. Su empleo puede llevar a identificar las esferas de mejoras con el objetivo de reducir la complejidad.

5. Conclusiones

Los errores humanos constituyen una fuente importante de problemas de calidad en la manufactura. En particular en aquellos procesos de producción en los cuales se recurre al ensamblaje manual. El análisis del error humano puede ser empleado como una estrategia eficaz en el mejoramiento continuo de la calidad de la producción. Para ello existen algunos métodos de análisis de fiabilidad humana que pueden ser aplicados al ensamblaje manual. Tal es el caso de los métodos SHERPA y HEART los cuales permiten identificar modos de error mediante el uso de taxonomías, así como evaluar el impacto de diferentes factores en el desempeño del trabajador en términos de probabilidad de error. La utilidad de estos métodos radica en que brindan un marco de referencia para el análisis del error humano en la manufactura y de esta manera ayudan a identificar e implementar estrategias de mitigación de errores basadas en la ergonomía. Su empleo permite la optimización del sistema de trabajo con un enfoque centrado en el humano.

Las tendencias actuales en la literatura muestran un creciente interés por el desarrollo de métodos de evaluación de la complejidad en el ensamblaje manual. Esto se debe a la importancia que este factor tiene en el desempeño del trabajador en términos de error humano. Para reducir la complejidad se recomienda simplificar el diseño del producto a ensamblar empleando metodologías como el diseño para el ensamblaje. En general, las instrucciones de trabajo y el sistema de información deben ser diseñados de manera a facilitar la comprensión de la tarea por parte del trabajador. Un elemento considerado como clave son las instrucciones de trabajo las cuales deben ser claras y tomar en cuenta los principios del tratamiento de información en los humanos basados en los procesos cognitivos tales como el razonamiento, la toma de decisiones y la memoria a corto plazo entre otros.

Referencias

- [1] K. G. Swift, J. D. Booker, "Chapter 10 - Assembly Systems", en *Manufacturing Process Selection Handbook*, K. G. Swift and J. D. Booker, Eds. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013, pp. 281-289.

- [2] F. Beuß, J. Sender, W. Flügge, "Ergonomics Simulation in Aircraft Manufacturing – Methods and Potentials", *Procedia CIRP*, vol. 81, pp. 742-746, 2019.
- [3] D. Correia, F. J. G. Silva, R. M. Gouveia, T. Pereira, L. P. Ferreira, "Improving manual assembly lines devoted to complex electronic devices by applying Lean tools", *Procedia Manufacturing*, vol. 17, pp. 663-671, 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.10.115
- [4] V. D. Pasquale, S. Miranda, W. P. Neumann, A. Setayesh, "Human reliability in manual assembly systems: a Systematic Literature Review", *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 11, pp. 675-680, 2018, doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.396
- [5] H. Bubb, "Human reliability: A key to improved quality in manufacturing", *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, vol. 15, no. 4, pp. 353-368, 2005, doi: 10.1002/hfm.20032
- [6] C. Kern, R. Refflinghaus, "Expert System for Evaluating Human Reliability in Manual Assembly Operations", en 18thToulon-Verona International Conference, Palermo, 2015.
- [7] B. J. Smales, "Introduction to britain as the workshop of the world 1830–1914", en *Economic History*, Ed.: Butterworth-Heinemann, 1975, pp. 55.
- [8] F. Alizon, S. B. Shooter, T. W. Simpson, "Henry Ford and the Model T: lessons for product platforming and mass customization", *Design Studies*, vol. 30, no. 5, pp. 588-605, 2009, doi: 10.1016/j.destud.2009.03.003
- [9] B. Lotter, H.-P. Wiendahl, "Changeable and Reconfigurable Assembly Systems", en *Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems*, H. A. ElMaraghy, Ed. London: Springer London, 2009, pp. 127-142.
- [10] D. Romero *et al.*, "Towards an Operator 4.0 Typology: A Human-Centric Perspective on the Fourth Industrial Revolution Technologies", en *CIE46 Proceedings*, Tianjin, China, 2016, pp. 1-11.
- [11] Y. Torres, S. Nadeau, "Operator 4.0 in manufacturing: trends, potential technologies and future perspectives", en *Frühjahrskongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft*, Berlin, Alemania, 2020, vol. 66.
- [12] Y. Torres, S. Nadeau, K. Landau, "Assembly Guidance Systems in Aerospace Manufacturing", en *Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft*, Alemania, 2020.
- [13] F. Kong, "Development of metric method and framework model of integrated complexity evaluations of production process for ergonomics workstations", *International Journal of Production Research*, vol. 57, no. 8, pp. 2429-2445, 2019, doi: 10.1080/00207543.2018.1519266
- [14] S. Mattsson, Å. Fast-Berglund, D. Li, P. Thorvald, "Forming a cognitive automation strategy for Operator 4.0 in complex assembly", *Computers & Industrial Engineering*, vol. 139, pp. 105360, 2018, doi: 10.1016/j.cie.2018.08.011
- [15] A. D. Swain, "Comparative evaluation of methods for human reliability analysis", Gesellschaft fuer Reaktorsicherheit m.b.H., Alemania, Rep. GRS--71, 1989.
- [16] E. Hollnagel, "Human reliability assessment in context", *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 37, no. 2, pp. 159-166, 2005.
- [17] A.-C. Falck, R. Örtengren, M. Rosenqvist, "Assembly failures and action cost in relation to complexity level and assembly ergonomics in manual assembly (part 2)", *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 44, no. 3, pp. 455-459, 2014, doi: 10.1016/j.ergon.2014.02.001
- [18] B. D. Richards, "Error Probabilities and Relationships in Assembly and Maintenance of Aircraft Engines", *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, vol. 62, no. 1, pp. 1599-1603, 2018, doi: 10.1177/1541931218621361
- [19] D. Gates, "Boeing tanker jets grounded due to tools and debris left during manufacturing," 2019 [En línea]. Disponible en: <https://www.seattletimes.com/business/boeing-aerospace/boeing-tanker-jets-grounded-due-to-tools-and-debris-left-during-manufacturing/>.
- [20] A.-C. Falck, M. Rosenqvist, "A model for calculation of the costs of poor assembly ergonomics (part 1)", *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 44, no. 1, pp. 140-147, 2014, doi: 10.1016/j.ergon.2013.11.013
- [21] A. D. Swain, H. E. Guttman, "Handbook of human-reliability analysis with emphasis on nuclear power plant applications. Final report", Sandia National Labs., Albuquerque, NM, USA, Rep. NUREG / CR - 1278, 1983.

- [22] B. Kirwan, "Human error identification in human reliability assessment. Part 1: Overview of approaches", *Applied Ergonomics*, vol. 23, no. 5, pp. 299-318, 1992, doi: 10.1016/0003-6870(92)90292-4
- [23] D. E. Embrey, "SHERPA: A systematic human error reduction and prediction approach", en *Proceedings of the international topical meeting on advances in human factors in nuclear power systems*. United States: American Nuclear Society, 1986, pp. 184-193.
- [24] Y. Torres, S. Nadeau, K. Landau, "Application of human errors analysis in manufacturing: A proposed intervention framework and techniques selection", en *Frühjahrskongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft*, Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft, 2019, vol. 65.
- [25] R. Lane, N. A. Stanton, D. Harrison, "Applying hierarchical task analysis to medication administration errors", *Applied Ergonomics*, vol. 37, no. 5, pp. 669-679, 2006, doi: 10.1016/j.apergo.2005.08.001
- [26] J. C. Williams, "Heart—A Proposed Method for Achieving High Reliability in Process Operation by Means of Human Factors Engineering Technology", *Safety and Reliability*, vol. 35, no. 3, pp. 5-25, 2015, doi: 10.1080/09617353.2015.11691046
- [27] A. Kolus, R. Wells, P. Neumann, "Production quality and human factors engineering: A systematic review and theoretical framework", *Applied Ergonomics*, vol. 73, pp. 55-89, 2018, doi: 10.1016/j.apergo.2018.05.010
- [28] P. Thorvald, J. Lindblom, R. Andreasson, "On the development of a method for cognitive load assessment in manufacturing", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 59, pp. 252-266, 2019, doi: 10.1016/j.rcim.2019.04.012
- [29] G. Fan, A. Li, Y. Zhao, G. Moroni, L. Xu, "Human factors' complexity measurement of human-based station of assembly line", *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, vol. 28, no. 6, pp. 342-351, 2018, doi: 10.1002/hfm.20738
- [30] A.-C. Falck, M. Tarrar, S. Mattsson, L. Andersson, M. Rosenqvist, R. Söderberg, "Assessment of manual assembly complexity: a theoretical and empirical comparison of two methods", *International Journal of Production Research*, vol. 55, no. 24, pp. 7237-7250, 2017, doi: 10.1080/00207543.2017.1330571
- [31] R. Kent, "Chapter 8 - Design quality management," en *Quality Management in Plastics Processing*, Ed.: Elsevier, 2016, pp. 227-262.
- [32] A. Mital, A. Desai, A. Subramanian, y A. Mital, "7 - Designing for Assembly and Disassembly," en *Product Development (Second Edition)*, Eds. Oxford: Elsevier, 2014, pp. 159-202.
- [33] H. Jack, "Chapter 9 - Universal Design Topics," en *Engineering Design, Planning, and Management*, Ed. Boston: Academic Press, 2013, pp. 323-380.
- [34] M. Richardson, G. Jones, M. Torrance, T. Baguley, "Identifying the Task Variables That Predict Object Assembly Difficulty", *Human Factors*, vol. 48, no. 3, pp. 511-525, 2006, doi: 10.1518/001872006778606868
- [35] S. Mattsson *et al.*, "Validation of the complexity index method at three manufacturing companies", en *IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM)*, 2013, pp. 55-57.
- [36] A.-C. Falck, R. Örtengren, M. Rosenqvist, R. Söderberg, "Criteria for Assessment of Basic Manual Assembly Complexity", *Procedia CIRP*, vol. 44, pp. 424-428, 2016, doi: 10.1016/j.procir.2016.02.152
- [37] X. Zhu, S. J. Hu, Y. Koren, S. P. Marin, "Modeling of Manufacturing Complexity in Mixed-Model Assembly Lines", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 130, no. 5, pp. 649-659, 2008, doi: 10.1115/MSEC2006-21078
- [38] L. Zeltzer, V. Limère, H. Van Landeghem, E.-H. Aghezzaf, J. Stahre, "Measuring complexity in mixed-model assembly workstations", *International Journal of Production Research*, vol. 51, no. 15, pp. 4630-4643, 2013, doi: 10.1080/00207543.2013.783246